

La scoperta delle onde gravitazionali

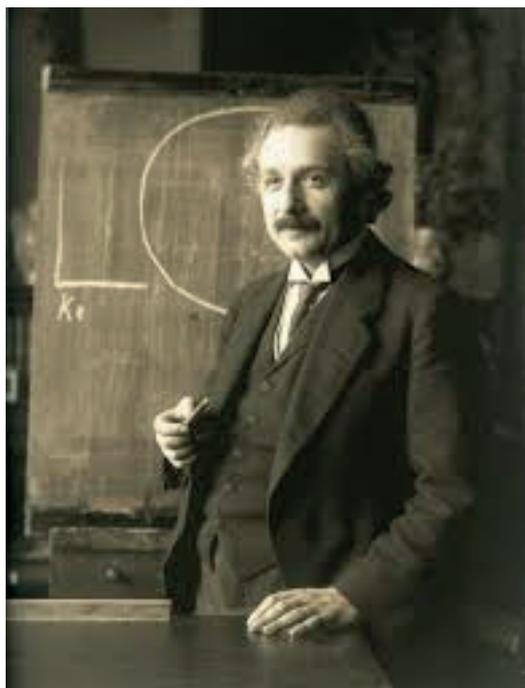
MARCO GIAMMARCHI

Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Milano

La scoperta delle Onde Gravitazionali è un punto di svolta nel completamento della migliore teoria che abbiamo della Gravitazione: la Relatività Generale. Dalla previsione di Einstein – nel 1916 – si è dovuto attendere un secolo per la conferma diretta del fenomeno. Una conferma che è anche una spettacolare osservazione astrofisica: l'evidenza più chiara mai riscontrata dell'esistenza di buchi neri.

1. INTRODUZIONE

Nell'anno 1915 venne proposta, da parte di Albert Einstein, una nuova teoria della Gravitazione. Si trattava della Relatività Generale (Allgemeine Relativitätstheorie), che descrive l'attrazione gravitazionale tra corpi in termini di curvatura dello spaziotempo. Tale curvatura viene generata dalle masse (anzi, dalle energie e dai flussi di energia) presenti nell'Universo e costituisce il tessuto – il palcoscenico – sul quale si muovono le particelle materiali, i corpi, i pianeti ed i quanti di luce. Questo tessuto spaziotemporale è plasmabile, può variare: un evento cosmico nel quale venga scambiata una grande quantità di energia gravitazionale ha infatti la potenzialità di perturbare lo spaziotempo. L'esistenza di queste perturbazioni (onde gravitazionali) venne prevista da Einstein stesso nel 1916 e a distanza di un secolo viene oggi verificata in modo spettacolare per la prima volta dai rivelatori della collaborazione internazionale LIGO-Virgo.



Albert Einstein

Questo è il coronamento di un lungo cammino di ricerca, svolta con accanimento e dedizione da parte di centinaia di scienziati che hanno conseguito un risultato di importanza fondamentale sulla strada del progresso della conoscenza.

Per comprenderne meglio l'importanza, introdurremo brevemente i concetti essenziali della Relatività Generale e descriveremo a grandi linee la problematica della ricerca delle onde gravitazionali. Nostro punto di partenza sarà il principio di equivalenza tra massa inerziale e massa gravitazionale.

2. IL PRINCIPIO DI EQUIVALENZA

La Relatività Generale è una teoria della Gravitazione che rispetta il Principio di Equivalenza. Chiariamo il significato di questa frase con un esempio specifico: ipotizziamo il caso di una particella carica (ad esempio un elettrone) immersa in un campo elettrico dato E . La forza subita da tale particella sarà pari a: $F = q E$, ove q è la sua carica elettrica. Se utilizziamo allora la legge della dinamica $F = m a$, possiamo subito vedere - uguagliando le due equazioni - che una particella in un campo elettrico subisce una accelerazione pari a:

$$a = \frac{q E}{m} .$$

Da questa relazione notiamo che l'accelerazione della particella dipende dalle sue caratteristiche intrinseche, e precisamente dalla sua massa e dalla sua carica elettrica. A parità di campo elettrico, un protone subirà una accelerazione 1860 volte minore di quella dell'elettrone perché la sua massa è 1860

volte più grande. Questa situazione vale anche per gli altri campi fisici fondamentali – quelli nucleari. Nel senso che in tali campi, ogni particella si comporta a seconda delle sue proprietà.

Nelle relazioni sopra, la massa che vi compare è la cosiddetta massa inerziale – la risposta di un corpo a una forza – che forse faremmo meglio a chiamare m_i (scrivendo quindi la seconda legge della dinamica come $F = m_i a$). Possiamo anche osservare che il rapporto q/m_i - che determina l'accelerazione della particella in un dato campo elettrostatico - dipende volta per volta dalle proprietà della stessa, appunto dalla sua carica e dalla sua massa.

Consideriamo invece il caso del campo gravitazionale, ad esempio il campo gravitazionale terrestre, assumendo che sia costante. Esprimiamo allora la forza peso che agisce su un corpo come $F = m_g g$, ove la costante m_g che mette in relazione la forza peso con il campo g è la massa gravitazionale – che potremmo meglio chiamare “carica gravitazionale”.

Ora, si osserva che il rapporto tra m_g e m_i (diversamente da quello tra q e m_i) è una costante universale, la stessa per ogni corpo materiale che si possa considerare. Quindi possiamo porre m_g / m_i uguale a un valore arbitrario, diciamo ad uno; questo significa considerare che massa inerziale e carica (massa) gravitazionale siano uguali. Questo fatto sperimentale è uno dei misteri più profondi della natura, il Principio di Equivalenza tra massa inerziale e massa gravitazionale.

Il Principio di Equivalenza ci dice quindi che l'inerzia come resistenza a una forza è uguale alla risposta al campo gravitazionale e che possiamo porre $m_i = m_g = m$. Come conseguenza, uguagliando le espressioni $F = ma$ e $F = mg$ otteniamo $ma = mg$, ovvero $a = g$. L'accelerazione nel campo gravitazionale non dipende dalle proprietà della particella o del corpo che stiamo considerando.

La differenza tra il campo gravitazionale e gli altri campi è evidente: mentre l'accelerazione di una particella in un campo elettrico dipenderà dalle caratteristiche intrinseche della particella, l'accelerazione gravitazionale sarà uguale per tutti i corpi, indipendentemente da come sono fatti. Questa uguaglianza tra inerzia e gravitazione, questa loro caratteristica universale ha permesso ad Einstein un formidabile salto concettuale. Quello di considerare che la gravitazione – anziché dovuta a proprietà dei corpi - sia invece una proprietà dello spaziotempo. Proprietà del paesaggio cosmico dove avviene il balletto dell'interazione gravitazionale.

E' importante sottolineare la profonda somiglianza tra le forze “inerziali” - come quelle sperimentate in un'auto che sterza bruscamente - e quelle gravitazionali. Nell'auto in cur-

va tutti i corpi vengono spinti verso la portiera indipendentemente dalle loro proprietà. In questo senso la forza “apparente” inerziale è assai simile – anzi, indistinguibile – rispetto all'azione di un campo gravitazionale. Questa analogia permise ad Einstein di generalizzare la Relatività Speciale (che tratta dei cambiamenti tra sistemi di riferimento inerziali) al caso di trasformazioni che collegano tra loro sistemi di riferimento non inerziali – proprio come un'auto in curva.

3. LA RELATIVITÀ GENERALE

La Relatività Generale [1] è quindi una teoria geometrica della gravitazione, una teoria nella quale lo spaziotempo viene descritto da una varietà (pseudo)riemanniana a 4 dimensioni (fig.1) curvata dalle forme di energia dell'universo. In questo “background” spaziotemporale, in questo sfondo, si trovano le particelle costituenti della materia. Si trovano i

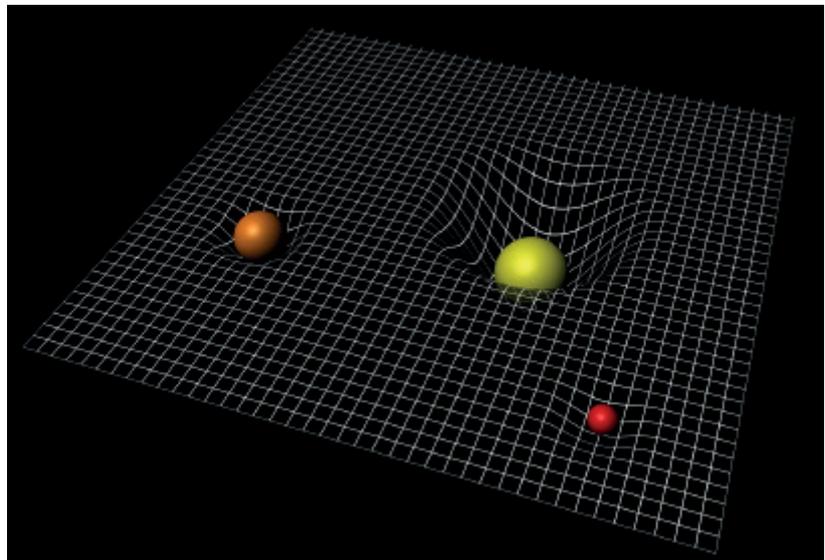


Fig. 1. Rappresentazione in due dimensioni della curvatura spaziotemporale dovuta alle masse (o energie) di stelle e pianeti. La reale dimensione dello spazio (3 coordinate spaziali e una temporale) non è rappresentabile graficamente, per cui ci accontentiamo di rappresentare la distorsione spaziale di un tessuto a due dimensioni, vista dalle tre dimensioni della nostra intuizione spaziale.

corpi piccoli e grandi di cui si occupano le scienze e la fisica.

La Relatività Generale presenta una innovazione concettuale decisiva rispetto alla teoria newtoniana della gravitazione: dal vecchio concetto di forza (generata dalle masse) come “azione istantanea a distanza” si passa all'idea di uno spaziotempo curvo (curvato dalle energie), e nel quale le interazioni si propagano a velocità finita – la velocità della luce nel vuoto.

Einstein formulò questa teoria ipotizzando che la gravitazione fosse un campo dinamico, che si propagasse nello spazio a alla velocità della luce e che obbedisse al Principio di Equivalenza.

In quanto teoria nella quale le energie hanno influenza sulle proprietà dello spaziotempo, la Relatività Generale ha delle conseguenze importanti per quanto riguarda gli inter-

valli di tempo e le dimensioni spaziali. Avviene infatti che il moto di un orologio dipende dal campo gravitazionale nel quale tale orologio è immerso (effetto analogo a quello che in Relatività Speciale viene prodotto da una trasformazione di Lorentz tra due sistemi di riferimento inerziali) e altrettanto avviene per le lunghezze. Infatti, la somma degli angoli interni di un triangolo è diversa da 180 gradi nella misura in cui lo spaziotempo ha una sua curvatura intrinseca (fig. 2).

Tuttavia la teoria newtoniana della gravitazione è una buona approssimazione alla Relatività Generale. Ad esempio

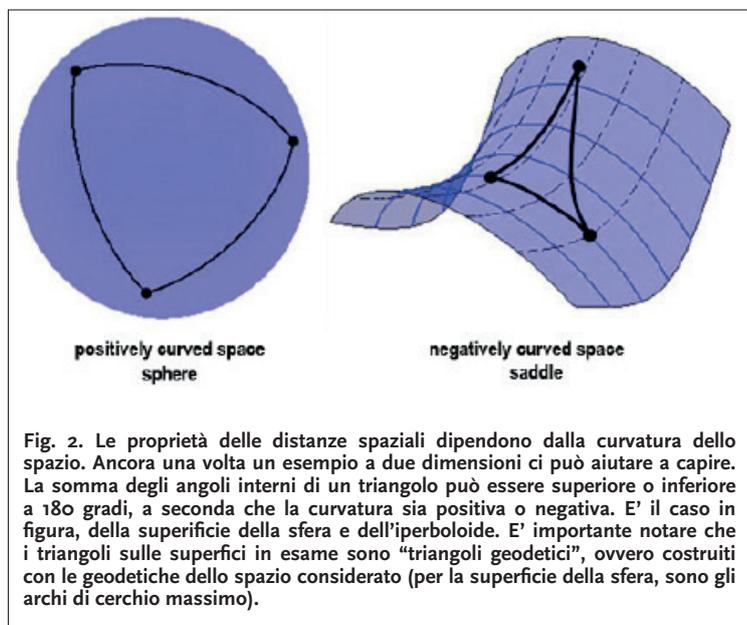


Fig. 2. Le proprietà delle distanze spaziali dipendono dalla curvatura dello spazio. Ancora una volta un esempio a due dimensioni ci può aiutare a capire. La somma degli angoli interni di un triangolo può essere superiore o inferiore a 180 gradi, a seconda che la curvatura sia positiva o negativa. E' il caso in figura, della superficie della sfera e dell'iperboloide. E' importante notare che i triangoli sulle superfici in esame sono "triangoli geodetici", ovvero costruiti con le geodetiche dello spazio considerato (per la superficie della sfera, sono gli archi di cerchio massimo).

nel sistema solare le correzioni relativistiche sono piuttosto piccole, inferiori allo 0.01%. Esse tuttavia sono chiaramente presenti, e si manifestano non solo nelle prove "storiche" della Relatività Generale (la precessione del perielio di Mercurio o la traiettoria della luce stellare nei pressi del Sole) ma anche e più in generale nelle caratteristiche del moto dei pianeti e nel il funzionamento del sistema di posizionamento globale GPS.

Le differenze tra Relatività Generale e teoria newtoniana della gravitazione sono piccole quando l'energia gravitazionale in gioco è relativamente modesta e le velocità sono molto inferiori alla velocità della luce. O anche quando il sistema non ha una scala cosmologica.

Al contrario, nel caso in cui, ad esempio, si debba studiare la dinamica dell'Universo, è essenziale utilizzare la Relatività Generale. Anzi, la Cosmologia ha proprio come punto di partenza le Equazioni di Campo di Einstein, le quali vengono applicate – con opportune semplificazioni – al sistema Universo nella sua totalità. La Cosmologia moderna, basata sulla Relatività Generale come teoria della gravitazione, ha peraltro raggiunto notevoli successi, come ad esempio la predizione dell'età dell'Universo e la comprensione di molte delle sue caratteristiche.

Quando si devono studiare sistemi come stelle di neutroni o buchi neri (energie gravitazionali elevate e concentrate in poco spazio), gli effetti di Relatività Generale sono decisivi;

l'esempio che possiamo considerare è quello di due masse enormi (maggiori della massa solare) in rapida rotazione l'una attorno all'altra: questo è ad esempio il caso di stelle a neutroni o buchi neri che formano sistemi binari.

Purtroppo tali sistemi, per quanto non rarissimi, sono difficili da osservare. Oppure è difficile osservarne il comportamento gravitazionale in quanto buchi neri e stelle di neutroni sono spesso accompagnati da nubi di gas ionizzati, poveri e particelle con le quali hanno interazioni importanti di natura elettromagnetica, che rendono difficile comprendere quale sia il loro comportamento gravitazionale.

Per via di queste difficoltà, la Relatività Generale è una teoria poco controllata proprio in uno dei suoi domini di applicazione più importanti: le situazioni di campo gravitazionale forte. Ed è proprio di due situazioni di campo forte che andiamo a parlare, di due scoperte di importanza storica: la pulsar binaria PSR1913+16 e l'emissione di onde gravitazionali GW150914.

4. L'EMISSIONE DI ONDE GRAVITAZIONALI

Ma come si deve presentare, dal punto di vista della teoria, un sistema che emette onde gravitazionali? Ricordiamo, per analogia, che il sistema più semplice che emetta onde elettromagnetiche, è il cosiddetto dipolo oscillante – una coppia di cariche positive e negative che oscilli lungo l'asse che le congiunge.

Dal punto di vista gravitazionale, invece, tale sistema (di due masse) non emetterebbe alcuna onda gravitazionale in quanto le masse sono sempre positive (a differenza delle cariche che sono positive o negative). A causa di questo fatto, il sistema di multipolo di ordine più basso che emette onde gravitazionali è il quadrupolo oscillante (fig. 3).

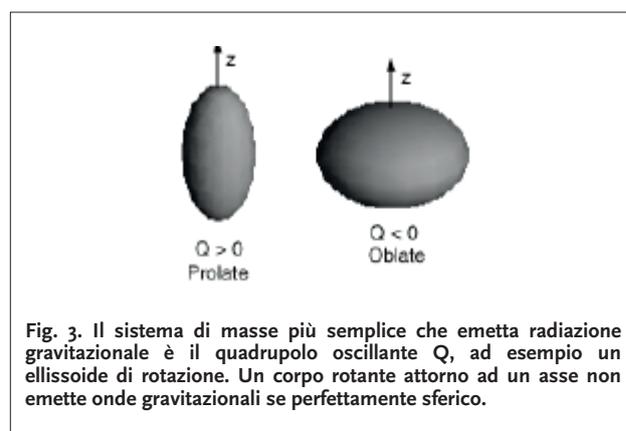


Fig. 3. Il sistema di masse più semplice che emetta radiazione gravitazionale è il quadrupolo oscillante Q , ad esempio un ellissoide di rotazione. Un corpo rotante attorno ad un asse non emette onde gravitazionali se perfettamente sferico.

Se allora consideriamo un qualsiasi sistema fisico con un momento di quadrupolo oscillante, esso emetterà onde gravitazionali. Ma quale è l'entità di tale emissione?

Le onde gravitazionali, ricordiamolo, sono perturbazioni dello spaziotempo che si manifestano su scala molto piccola. Questo avviene perché la costante di gravitazione universa-

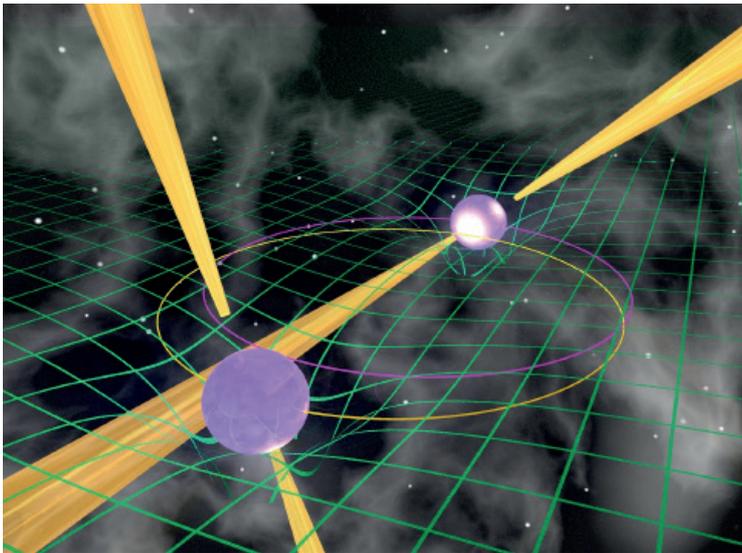


Fig. 4. Una pulsar binaria è un sistema di due stelle di neutroni che emettono radiazione elettromagnetica mentre ruotano rapidamente l'una attorno all'altra. Un sistema di questo tipo è generalmente un buon emettitore di onde gravitazionali.

flusso, di distanza.

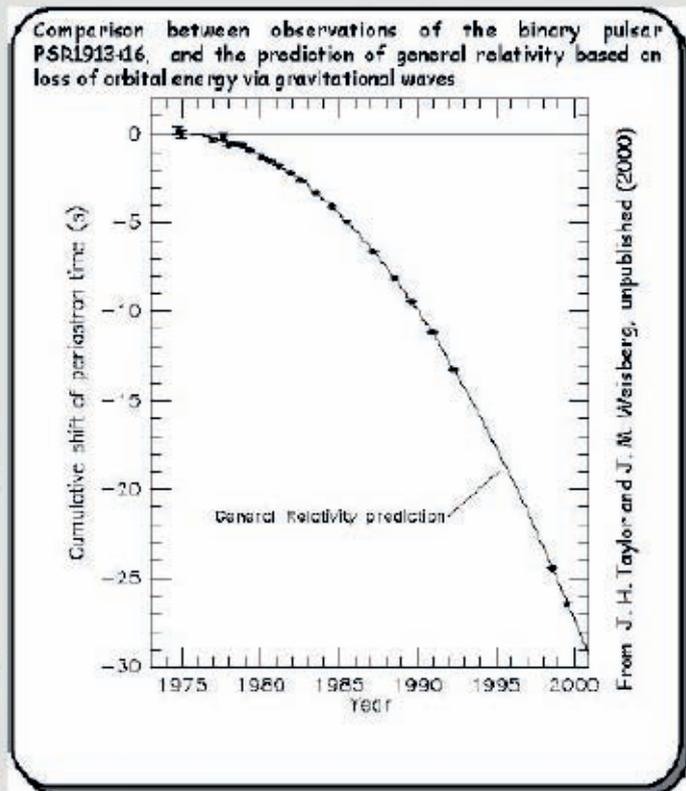
Per questo motivo, le interazioni gravitazionali generate dai fenomeni astrofisici che considereremo, danno luogo a perturbazioni sulla Terra dell'ordine di $h \approx 10^{-21}$. Questo significa, ad esempio, che se consideriamo una lunghezza l tra due masse in caduta libera, essa viene alterata di una parte su 10^{21} parti: la sua variazione di lunghezza sarà solo $\Delta l = h l \approx 10^{-21} l$. E' una quantità veramente piccola ed infatti la prima evidenza di onde gravitazionali fu una evidenza indiretta: si tratta della famosa pulsar binaria studiata da Russel Hulse e Joseph Taylor negli anni '70.

Una pulsar binaria è composta da due pulsar (stelle di neutroni che emettono getti molto regolari di onde elettromagnetiche, fig. 4). Tale sistema – se stabile - è caratterizzato da una estrema regolarità nel moto orbitale e nel moto proprio di rotazione delle due pulsar. Date poi le caratteristiche tipiche delle due stelle (qualche massa solare), la loro piccola distanza (spesso dell'ordine di solo un milione di chilometri) e la velocità con la quale esse ruotano l'una attorno all'altra (tipicamente poche ore), possiamo capire che si possa trattare di un potente radiatore di onde gravitazionali.

le ha un valore assai ridotto: la gravitazione risulta infatti trascurabile alla scala microscopica, quando la si confronti con le altre interazioni fondamentali. A questo si aggiunge il fatto che la perturbazione deve coprire distanze astronomiche per raggiungerci, venendo così indebolita per ragioni di

le ha un valore assai ridotto: la gravitazione risulta infatti trascurabile alla scala microscopica, quando la si confronti con le altre interazioni fondamentali. A questo si aggiunge il fatto che la perturbazione deve coprire distanze astronomiche per raggiungerci, venendo così indebolita per ragioni di

Evidenza "indiretta" d'esistenza delle Onde Gravitazionali



Figg. 5-6. Hulse e Taylor festeggiano la scoperta della perdita di energia nel tempo della pulsar binaria PSR1913+16. Il cambiamento del tempo di periastro (corrispondente a un rallentamento del periodo di rotazione di soli 76.5 microsecondi all'anno) è pienamente in accordo con quanto previsto dalla Relatività Generale nel caso in cui l'energia venga persa per mezzo di onde gravitazionali.

Immaginiamo allora di osservare il periodo di rotazione reciproco delle due pulsar e usare il principio di conservazione dell'energia. Infatti, se vengono emesse onde gravitazionali, esse inevitabilmente trasportano energia che viene quindi sottratta al sistema. In conseguenza dell'energia persa, il periodo di rotazione delle pulsar finirà col diminuire.

Negli anni 1973-74, Russel Hulse e Joe Taylor utilizzarono il radiotelescopio di Arecibo – a Puerto Rico – per studiare il sistema PSR1913+16 (due pulsar di 1.4 masse solari l'una, con un periodo di rotazione di otto ore). Essi trovarono che le caratteristiche orbitali del sistema (come il tempo di ripetizione del periastro) si spostava nel tempo, indicando una certa perdita di energia. Tale perdita di energia coincideva precisamente con la previsione della teoria per un radiatore di onde gravitazionali con le proprietà delle due pulsar (figg. 5-6).

Questa scoperta – che valse ai due autori il Premio Nobel – dimostrò chiaramente l'esistenza di onde gravitazionali. Tuttavia, non si trattava ancora di una osservazione diretta in quanto le onde gravitazionali emesse infatti non venivano osservate.

LA RIVELAZIONE DI ONDE GRAVITAZIONALI

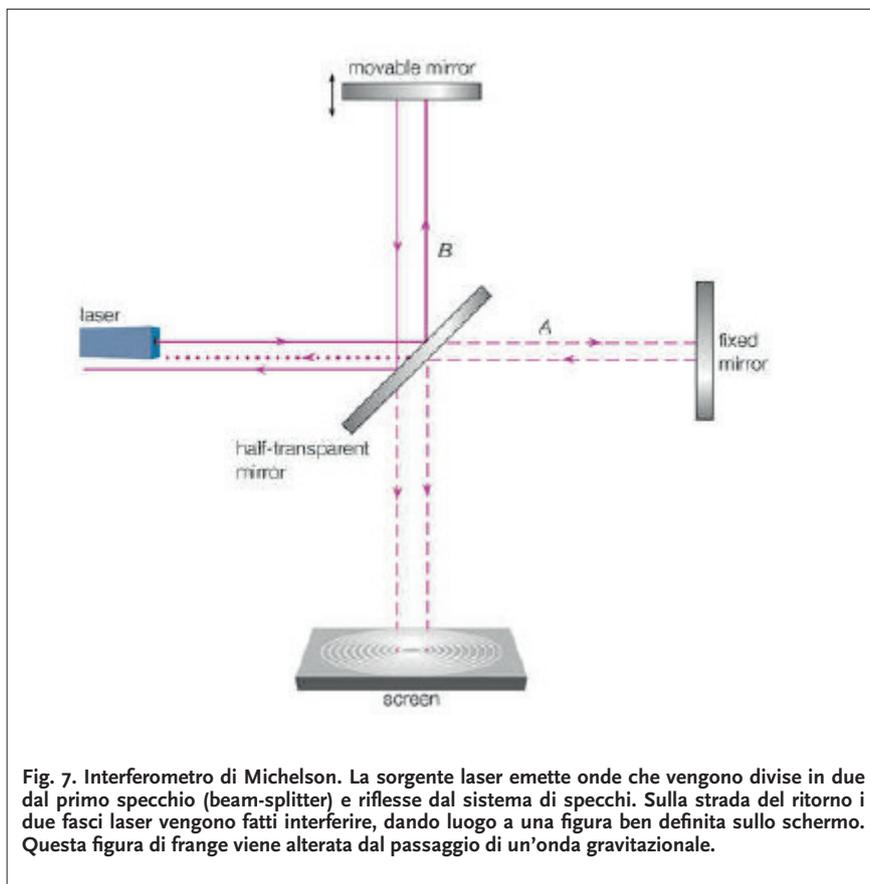
L'idea di rivelare direttamente le onde gravitazionali venne dibattuta a lungo, sia dallo stesso Einstein che da altri studiosi. Il primo a ideare una tecnica sperimentale per rivelare questi effetti debolissimi fu Joseph Weber nel 1960; egli ipotizzò che il passaggio di un'onda gravitazionale avrebbe potuto provocare un segnale rivelabile in un rivelatore criogenico, una barra risonante [2]. Weber costruì effettivamente tale rivelatore all'Università del Maryland, ma non fu mai in grado di vedere effettivamente dei segnali gravitazionali.

L'importanza concettuale dell'idea di Weber ebbe però un notevole impatto e in Europa il gruppo fondato da

Edoardo Amaldi realizzò, nel corso di svariati decenni, le tre barre criogeniche più sensibili: Explorer (al CERN), Auriga (A Legnaro, Padova) e Nautilus (a Frascati).

Purtroppo nemmeno queste barre criogeniche avevano una sensibilità sufficiente per rivelare onde gravitazionali dalle sorgenti realistiche che si trovano nel cosmo. Un autentico "breakthrough" si verificò invece con l'introduzione dei rivelatori interferometrici, e precisamente gli interferometri di Michelson in modalità Fabry-Perot.

Un interferometro di Michelson è un sistema nel quale due fasci laser aventi una origine comune, vengono riflessi da due specchi e poi interferiscono, come mostrato in fig. 7. Il



risultato dell'interferenza è un insieme di frange che rimangono ferme su uno schermo. Se però la posizione di uno degli specchi viene cambiata, ad esempio se uno degli specchi si mette in oscillazione, il sistema di frange si sposterà. Questo è il principio della rivelazione di un'onda gravitazionale: essendo una perturbazione dello spaziotempo, essa causa – al suo passaggio – delle oscillazioni degli specchi che fanno variare le frange di interferenza. Queste oscillazioni sono dovute alla vibrazione stessa del tessuto spaziotemporale, che si allunga e si accorcia periodicamente in seguito alla perturbazione gravitazionale.

Interferometri di questo tipo furono costruiti alla fine degli anni '80 dalla collaborazione americana LIGO (Laser-Interferometry Gravitational-Wave Observatory) e dal gruppo italo-francese di Virgo (dall'omonimo cluster di galassie). L'interferometro di Virgo [3] venne inizialmente proposto da un gruppo guidato da Alain Brillet e Adalberto Giazotto e situato a Cascina (Pisa); i suoi bracci interferometrici (fig. 8) hanno una lunghezza di 3 km. L'apparato di LIGO [4] è stato realizzato da un gruppo guidato da Reiner Weiss e Paul Drever, insieme all'esperto di buchi neri Kip Thorne, noto al grande pubblico per essere stato il consulente scientifico del film "Interstellar". LIGO (fig. 9) consiste di due sistemi interferometrici situati a 3000 km di distanza tra loro, rispettivamente a Hanford (Washington State) e Livingston (Louisiana): si tratta degli apparati che hanno osservato il passaggio dell'onda gravitazionale.

Vale la pena a questo punto dire che i due gruppi di scienziati appartenenti alle due collaborazioni LIGO e Virgo



Fig. 8. Interferometro di Virgo è situato a Cascina, in provincia di Pisa. I suoi bracci hanno una lunghezza di 3 km.

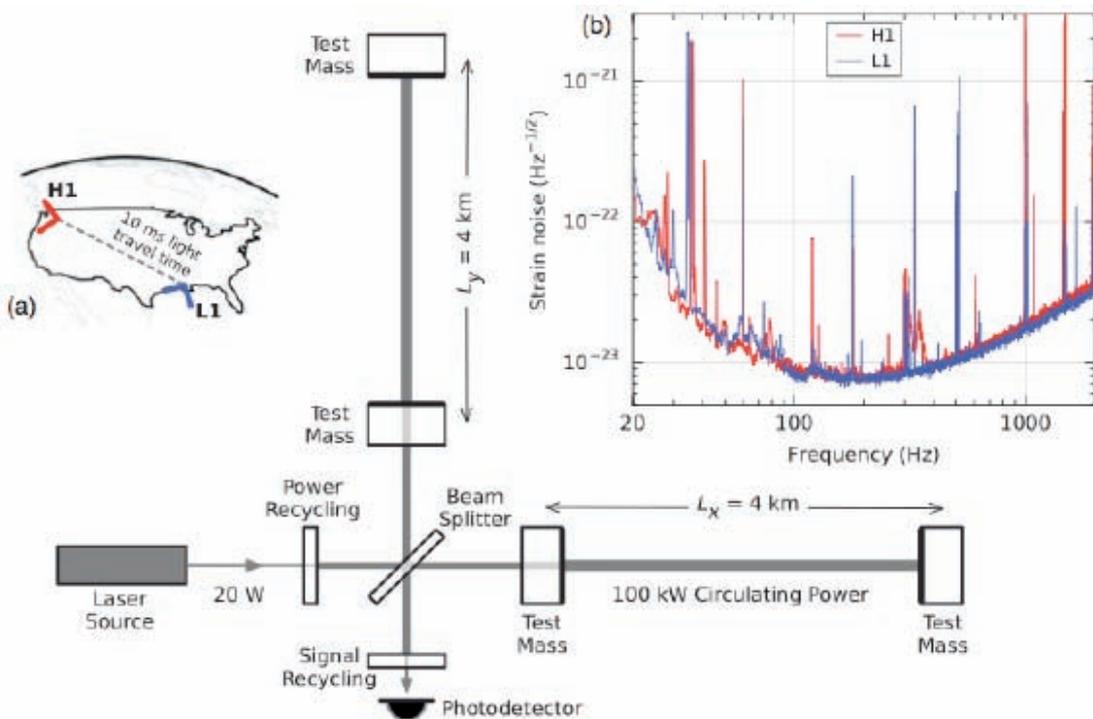


Fig. 9. Posizione degli interferometri di LIGO, loro schema concettuale e loro curva tipica di risposta (da [5]). Questa curva definisce il valore minimo della deformazione visibile in funzione della frequenza della stessa (dell'onda gravitazionale).

hanno deciso, fin dal 2007, di gestire e analizzare in comune i dati dei tre apparati di Hanford, Livingston e Cascina che vengono quindi a costituire un unico sistema di rivelazione gestito da una comunità di circa 1000 fisici di vari paesi del mondo.

Tutti questi interferometri di Michelson funzionano in modalità Fabry-Perot, con i fasci laser che vengono aumentati notevolmente di potenza e fatti circolare migliaia di volte tra gli specchi, allungando così la lunghezza efficace dei bracci interferometrici da qualche chilometro a migliaia di chilometri. Questo fattore di amplificazione è importante per aumentare la sensibilità dell'interferometro al passaggio di un'onda gravitazionale.

Se infatti la lunghezza di un ipotetico interferometro fosse di 1 km, l'uso della tecnica Fabry-Perot nel caso di mille riflessioni ne porta la lunghezza efficace di 1000 km. Ma siccome l'effetto dell'onda gravitazionale è estremamente piccolo – nel nostro esempio 10^{-21} – l'impresa resta sempre straordinaria. Una variazione di questa entità equivale a misurare una lunghezza di $\Delta l = h l \approx 10^{-21} l = 10^{-21} \cdot 1000 \text{ km} = 10^{-15} \text{ m}$.

Il sistema interferometrico deve essere quindi tale da misurare uno spostamento simile alla dimensione di un protone.

La quantità critica da considerare è allora la sensibilità sperimentale, rappresentata nel caso di LIGO dal grafico in alto a destra della fig. 9. Questa curva ci fornisce lo spettro di oscillazioni tipiche del sistema e dovuto a diversi tipi di rumore (sismico, termico, rumore "shot"...). E' natural-

mente essenziale che il segnale gravitazionale osservato, per la frequenza che stiamo considerando, superi la curva di rumore. Questo fortunatamente è stato il caso del segnale GW150914.

5. GW150914

Come recita l'articolo [5], il giorno 14 Settembre 2015, gli interferometri di Hanford e Livingston osservano un segnale simultaneo (entro i 10 ms di differenza dovuti alla distanza di 3000 km tra i due interferometri percorsa alla velocità della luce). Questi due segnali, riportati in fig. 10, sono in ottimo accordo tra di loro e corrispondono benissimo a quanto atteso per la coalescenza di due buchi neri.

Il segnale rivelato è di una chiarezza ed intensità veramente da manuale, tale da permettere – grazie ai modelli di analisi basati sulla Relatività Generale – di misurare praticamente tutte le caratteristiche del sistema che lo ha generato. Il segnale osservato sarebbe stato perfettamente visibile anche nell'interferometro di Cascina che però in quel momento era spento per un aggiornamento.

Non vi sono dubbi di alcun tipo sulla genuinità del segnale, confermato sia dalla forma che dal suo avvenire in modo del tutto simultaneo (a parte il tempo di propagazione) tra Hanford e Livingston. Grazie alle analisi effettuate e ai programmi sofisticati di analisi sviluppati dalla collaborazione LIGO-Virgo, è stato possibile misurare le caratteristiche del sistema che ha dato luogo a questo evento cosmico.

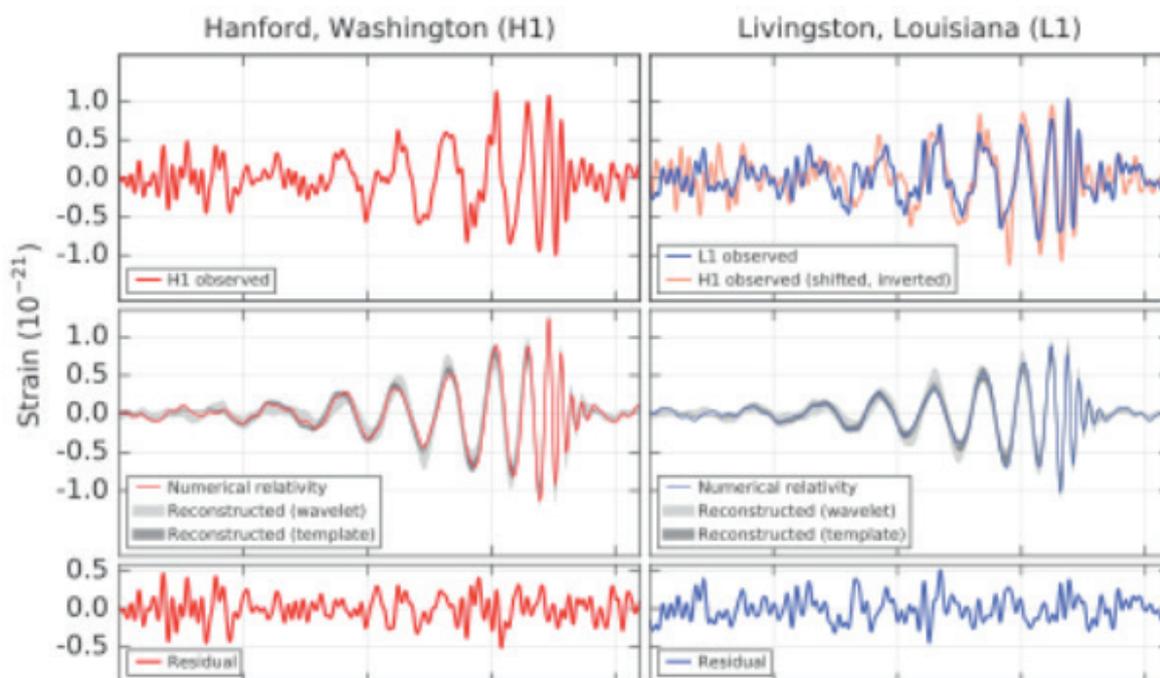


Fig. 10. Segnali sugli interferometri (da [5]). In alto a sinistra il segnale visto a Hanford e in alto a destra (in blu) il segnale visto a Livingston. Nella figura in alto a destra al segnale blu è sovrapposto quello di Hanford in rosso (leggermente spostato) per facilitare il confronto. L'accordo tra i due segnali è ottimo. I due riquadri sotto indicano la forma ideale del segnale secondo le previsioni numeriche della Relatività Generale per i parametri identificati dall'interpolazione del segnale. I due riquadri in basso mostrano la differenza tra il segnale interpolato e quello osservato: rimangono solo fluttuazioni statistiche, a indicare la validità dell'interpolazione. L'intera scala temporale (l'asse delle ascisse) va da 0 a 0.5 secondi.

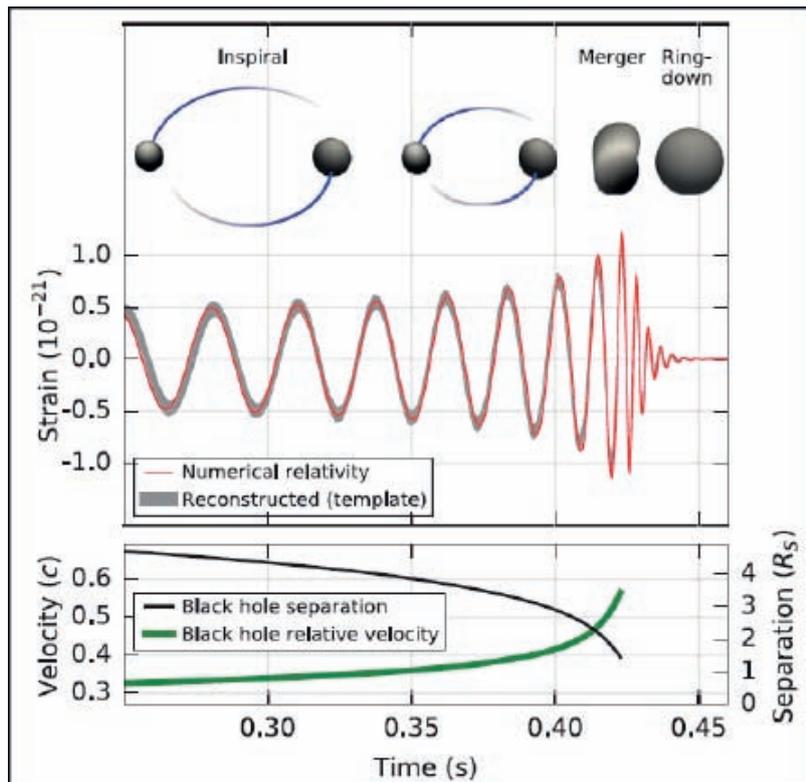


Fig. 11. Rappresentazione dell'evento cosmico che ha portato alla rivelazione delle onde gravitazionali (dalla referenza [5]). La figura in basso illustra come, nella fase di avvicinamento, i due buchi neri abbiano una velocità relativa che arriva fino al 60% della velocità della luce.

Innanzitutto, conosciamo bene le masse dei due buchi neri, che sono di circa una trentina di masse solari l'uno. Buchi neri molto massivi, quindi, ma non certo i buchi neri supermassivi che sono ipotizzati risiedere al centro delle galassie. La storia dell'evento è anche chiarissima: i due buchi neri si sono avvicinati, spiraleggiando l'uno attorno all'altro e, nel corso di mezzo secondo in tutto, hanno effettuato una danza cosmica impressionante venendo a fondersi in un unico buco nero finale.

Il movimento reciproco a spirale (chirp) ha portato i due buchi neri iniziali a ruotare con una velocità impressionante, fino a raggiungere, prima del collasso reciproco, una velocità pari a metà della velocità della luce! Il risultato, il buco nero finale, ha poi attraversato una fase di assestamento (ringdown) alla fine della quale è divenuto un buco nero di Kerr (un buco nero in rotazione su se stesso). Tutte queste informazioni relative alle varie fasi del processo si possono dedurre dalla forma d'onda del segnale (Tabella I e fig. 11).

Tabella I. Parametri fisici del sistema osservato da LIGO (presi dall'articolo originale [5]). In questa tabella non sono stati riportati gli errori sperimentali, per i quali si rimanda all'articolo originale.

Massa del primo buco nero	36 Masse Solari
Massa del secondo buco nero	29 Masse Solari
Massa del buco nero finale	62 Masse Solari
Distanza stimata	230 – 670 Mpc (in anni luce, please)

Un altro fatto spettacolare si comprende analizzando i parametri che compaiono nella tabella I: il buco nero finale ha massa di 3 Soli inferiore alla somma dei buchi neri iniziali. Quindi ben 3 masse solari sono state convertite in energia che si è propagata nello spazio in forma di onde gravitazionali. Abbiamo a che fare quindi con un evento cosmico nel quale si è rilasciata una energia spaventosa: nel momento del collasso finale la potenza di picco irradiata è risultata pari addirittura a 1000 volte la potenza tipica di una supernova!

Questa incredibile energia liberata ha reso possibile la rivelazione a terra dell'onda gravitazionale, superando una enorme distanza, circa un miliardo di anni luce. La determinazione della distanza, tuttavia, realizzata con la differenza dei tempi di arrivo dei due interferometri, è afflitta da una grave incertezza (Tab. I).

Un altro aspetto importante di questa scoperta è il suo carattere squisitamente astrofisico; anche se noi avessimo già rivelato onde gravitazionali in modo diretto (con qualche altra tecnica), questa sarebbe comunque una osservazione di eccezionale importanza. Si tratterebbe infatti della migliore evidenza disponibile dell'esistenza dello stadio finale di un collasso gravitazionale, estrema espressione di gravità, di curvatura di spaziotempo: il buco nero.

Infatti, solo una coppia di buchi neri può eseguire questo tipo di coalescenza, girando fino alla frequenza di 75 Hz nel momento del collasso. Nessun altro sistema conosciuto può realizzare una danza cosmica così rapida. Alla fine dell'evento cosmico, i due buchi neri si sono compenetrati in un unico buco nero rimanente, confinando una sessantina di masse solari in uno spazio dell'ordine di solo 200 km, come la distanza tra Milano e Padova. Il buco nero finale, dopo il ringdown, si è assestato in uno stato molto più quieto, smettendo di emettere onde gravitazionali in maniera consistente.

Riassumendo, l'evento GW150914 ha prodotto onde gravitazionali che sono state rivelate direttamente per la prima volta. Esso costituisce anche la dimostrazione migliore dell'esistenza di buchi neri; questa scoperta è di importanza eccezionale e l'articolo [5] entra nella storia della fisica e della conoscenza umana.

6. IL FUTURO DELLE ONDE GRAVITAZIONALI

Come tutte le grandi scoperte, l'osservazione diretta di Onde Gravitazionali ha conseguenze concettuali di importanza enorme. Prima fra tutte, la conferma della Relatività

Generale come teoria della gravitazione; questa è una delle prime volte nelle quali questa teoria viene verificata in regime di campo forte, addirittura con trasformazione di circa il 5% della massa in energia secondo la relazione $E=mc^2$ (le famose tre masse solari di cui sopra). Viene anche confermata la previsione di Einstein sull'emissione di onde gravitazionali da parte di un quadrupolo oscillante (o di un multipolo di ordine superiore), coronando pienamente la Relatività Generale come teoria classica della gravitazione.

Infine, come tutte le grandi scoperte, essa apre le porte di un futuro promettente. Altri sistemi di questo tipo verranno presumibilmente osservati; quasi certamente si osserveranno altre binarie coalescenti come questa coppia di buchi neri, o coppie formate da una stella di neutroni e un buco nero che collassano. Altre ricerche di onde gravitazionali sono in corso ed esse riguardano sorgenti di tipo stazionario, come la Vela o la Crab. Questi resti di supernova celano stelle di neutroni rapidamente rotanti le quali, se provviste di piccole deviazioni dalla simmetria sferica (e quindi di un quadrupolo non nullo) possono emettere onde gravitazionali. Infine, anche lo studio del background gravitazionale generale e il miglioramento delle tecniche di osservazione potranno eventualmente rendere possibile la rivelazione di radiazione gravitazionale di origine cosmologica, l'informazione più antica che possiamo immaginare, risalente ben dentro il primo secondo di vita dell'Universo. In breve, questa scoperta delinea un grande inizio: l'inizio dello studio dell'Universo tramite la radiazione gravitazionale, il primo giorno di una scienza che presto verrà chiamata Astronomia Gravitazionale.

RINGRAZIAMENTI

Questo è solo un piccolo resoconto di una grande scoperta, e nemmeno scritto da uno degli autori della stessa. Il primo dei miei ringraziamenti va quindi al gruppo di LIGO-Virgo, ai 1000 fisici che – nello scoprire la radiazione gravitazionale – ci hanno regalato una grande emozione. Ringrazio in particolare gli uomini e le donne di Virgo a Cascina, Fulvio Ricci, Adalberto Giazotto, Francesco Fidecaro, Giovanni Losurdo, Eugenio Coccia e tutti gli altri (e mi spiace non poterli citare tutti) che ci hanno fatti partecipi della loro ricerca.

E' giusto in questa sede menzionare l'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare e l'European Gravitational Observatory (italo-francese) che finanziano, nonostante le ben note difficoltà, questa ricerca, presso il sito italiano di Cascina.

Per ultimo, *last but not least*, ringrazio il mio Maestro di Relatività Generale, Vittorio Gorini, per avere letto questo manoscritto e per avermi insegnato che questa teoria è (e cito le sue parole) l' "apogeo della fisica classica".

BIBLIOGRAFIA

- 1) B. Schutz, A First Course in General Relativity, Cambridge University Press, 2009.
- 2) J. Weber, Physical Review 117 (1960) 306.

- 3) A. Brilliet, A. Giazotto et al., Virgo Project Technical Report No. VIR-0517A-15, 1989, <https://tds.ego-gw.it/ql/?c=11247>.

- 4) R.W.P. Drever, F.J. Raab, K.S. Thorne, R. Vogt e R. Weiss, Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory (LIGO) Technical Report, 1989, <https://dcc.ligo.org/LIGO-M890001/public/main>.

- 5) B.P. Abbott et al. (LIGO and Virgo Collaboration), Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger, Physical Review Letters 116 (2016) 061102.